

円筒物体の握り感覚の解明*

高野 剛*¹, 山本 仁*², 原 利昭*³

Analysis of Sensibility Factor for Grasping of a Solid Cylinder

Tsuyoshi TAKANO, Hitoshi YAMAMOTO and Toshiaki HARA

In this work, a grip force dynamometer composed of pressure-sensitive conductive rubber was used to study the sensibility characteristics for grasping of a solid cylinder. The mechanical and physical parameters for ten normal male subjects (aged between 22 and 26) were measured at various cylinder diameters and weights. In addition, a direct linear transformation technique employing a video camera system was developed to determine the finger joint motion used to grasp the cylinder. The experimental results showed that the frictional coefficient of a palm is significantly dependent upon the deform ability of the soft tissue of the palm. It was found that the optimum cylinder diameter for easy grasping is nearly equal to the inner grip diameter formed by the fingers.

Key Words: Biomechanics, Muscle and Skeleton, Human Engineering, Bio-Motion, Human Interface, Muscle Force, Grip Force, Grip Sensibility, Frictional Coefficient

1. 緒 言

人間-機械系インタフェースを考える上で、手は極めて重要な役割を果たしている。人間の手は、握る、触れる、撫でるなど様々な動作を感覚、感情を伴ってスムーズに行うことができる。また、温覚、冷覚、痛覚、触覚などの感覚情報をも瞬時に得ることが可能である。特に、他の動物に比べて拇指の可動範囲が広いため、どのような形状の物体を握る場合においても確実に捉え、あるいは捉えようとするのが可能な特性を有している。このような手の優れた機能を利用して機械を操作したり、用具を使用するためには“握り易さ”とともに“使い易さ”を十分考慮して機械や用具の設計を行う必要がある。しかしながら、これらの感覚的概念を取扱う十分な手法が確立されていない現状から、人間工学に基づいて機械や用具を設計することは基本的かつ重要であるが、未だ十分とは言えないようである。

人間の把握機能に関する研究として、木下ら⁽¹⁾によ

る持ち上げ作業に伴う把握時の個々の指の機械的、運動的研究や Radwin ら⁽²⁾による全指で静的にピンチ把握するときの各指の力に関する研究および Buchholz ら⁽³⁾による種々の材料と手掌皮膚間の摩擦およびこれに及ぼすピンチ力と手掌部の水分の影響に関する研究、Gurram ら⁽⁴⁾による動的負荷に伴う指屈筋のグリップ圧力と筋電位に関する研究などがある。しかし、これらの多くは、拇指の他の4指により挟む形態のピンチ把握(Pinch prehension)を対象とした研究であり、全指を使って手掌を物体に接触させる把握形態、すなわち、全手掌把握(Full palmar prehension)時を対象とした研究は少ないようである。さらには、“握り易さ”の感覚を対象とした研究は、主として人間工学的観点から行われているが、官能評価のみに基づく研究が大半を占めており、バイオメカニクスの観点からの研究の必要性が指摘されているにもかかわらず極めて少ない⁽⁵⁾のが現状である。

そこで本研究では、脳の感覚・知覚のメカニズムを解明する研究の一環として円筒物体の握り易さの感覚因子を明らかにするために、直径および重さの異なる円筒物体を把握する場合の力学的物理量を測定するとともに、同時に行った握り感覚の主観的申告に基づく官能検査結果との関連性を解析した。これらに基づい

* 原稿受付 1996年3月21日。

¹ 正員, 新潟大学大学院 (〒950-21 新潟市五十嵐2ノ町8050)。² 学生員, 新潟大学大学院。³ 正員, 新潟大学工学部。

て円筒把握時の握り易さに関係する因子について検討した。

2. 実験方法

円筒を握る動作の主たる構成要因は把握に必要な手から円筒への伝達力を生み出す筋力、安定した握り状態を維持するための指関節の屈曲角度および円筒を握る力等である。このとき、手指掌と円筒間の接触圧力、接触面積、摩擦係数もこれらに含まれると考えられる。したがって、このような握り動作に関係した物理量を実験的に求め、円筒を握る動作に伴う感覚要因との関連性を調べるとともに握り感覚の官能検査結果を比較、検討すれば円筒の握りに関係する脳の情報処理メカニズムを解明するための基礎データを提供することも可能になると考えられる。

本研究では、年齢 22~26 歳の成人男性 10 名を被験者とした。測定データをできるだけ統一的条件のもとで扱うことを考慮して各被験者の手の寸法を図 1 に示すように標準化された人体寸法計測項目⁽⁶⁾に基づいて手長、手掌長、手幅、握り最外径および握り内径の各部を測定した。得られた結果を表 1 に示す。これら 10 名の被験者より得られた手長、手掌長および手幅の平均値は、従来の日本人の成人男性を対象にした測定資料^{(7)~(9)}の平均値に極めて一致する。

Table 1 Physical parameters for hand

(Unit : mm)

Subject	Hand length	Palm length	Hand breadth	Outer grip diameter	Inner grip diameter
A	185	105	85	89	41
B	178	103	83	84	40
C	186	106	89	89	39
D	182	98	76	77	32
E	177	98	79	88	39
F	179	102	87	84	34
G	187	109	86	91	38
H	178	104	80	80	34
I	188	105	86	85	37
J	181	107	83	83	37
Average	182.1	103.7	83.4	85	37.1

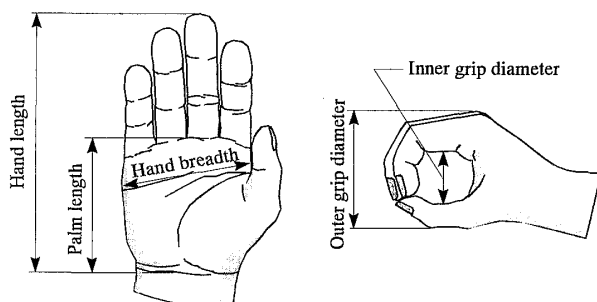


Fig. 1 Geometry of hand and fingers

円筒の把握力を測定するために、図 2 に示す感圧導電ゴムを利用した握力計を製作した。この握力計は、長さ 200 mm の塩化ビニール製パイプを中心部に有し、その周囲を厚さ約 0.5 mm の感圧導電ゴムシート材と約 0.2 mm 厚の 2 枚の銅はく電極を巻いた上をさらに厚さ約 0.5 mm のアルミニウム製薄板で覆った構造から成る。握り感覚に及ぼす握り部分の太さの影響を調べるために直径が 18 mm, 26 mm, 38 mm, 48 mm, 60 mm の握り部分を有する 5 種類の握力計を製作した。

これら握力計の電気特性を求めるために、握力計の長軸方向を水平となるように固定し、握り部分の周囲に一端を上方で固定した幅 50 mm, 厚さ約 0.5 mm の塩化ビニール製の帯を 1 回巻付け、他の一端に重さ 9.8 N, 19.6 N, 29.4 N, 39.2 N, 49.0 N, 58.8 N のおもりをそれぞれ吊り下げる方法を採用した。これにより作用荷重-出力電圧の関係を調べた。

実験を単純化するために、上腕二頭筋による対象物体の持ち上げ力が作用せず、把握に必要な前腕腹側筋

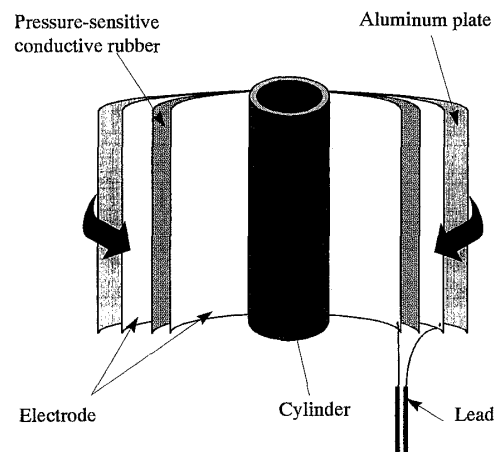


Fig. 2 Geometry of grip force dynamometer

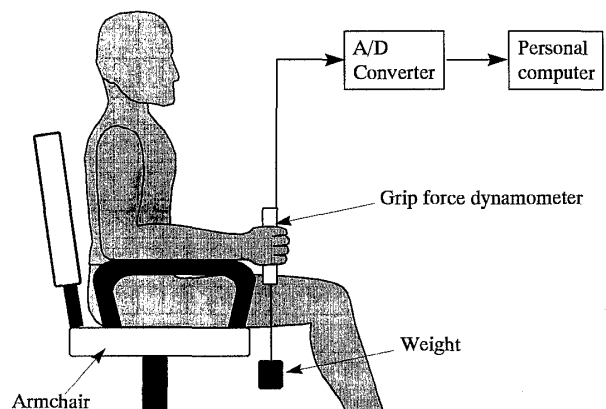


Fig. 3 Experimental set up

の指屈筋による把握力のみが作用する条件を考慮した。そのため図3に示すように水平な肘掛け付きの椅子を用いて被験者の前腕を肘掛け上に置き、肘関節をほぼ直角に曲げた着座姿勢で測定を行った。それぞれの握力計の握り部分の直径に対して、作用荷重を変えることにより、握力計を垂直方向に維持したときの全手掌把握による把握力を測定した。

また、並行して各被験者の握り感覚の主観的申告結果を得るために意味測定法(Semantic Differential Technique: 以下SD法)による円筒把握時の表面、太さ、重量、保持の感覚、適合感とこれらを総合した“握り易さ”の感覚から成る6項目を7段階に表現する官能検査を行った。

円筒を把握するための筋力を表面筋電位(Surface Electromyogram)を利用して測定し、従来の報告⁽¹⁰⁾で広く用いられている筋出力の指標となる筋電図積分量(Integrated Electromyogram: 以下 Integrated EMG)を考慮した。表面筋電位の測定は、図4に示すように物体把握に関係する前腕腹側筋の浅指屈筋皮膚上に表面筋電位電極を配置して行った。表面筋電位を測定するに当たって、図3に示す把握力を測定する場合と同様な条件において円筒を把握して3秒経過後、約1秒間筋電位を測定した。

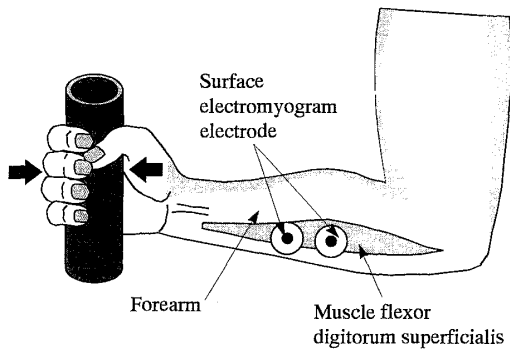


Fig. 4 Geometry of surface electromyogram electrode

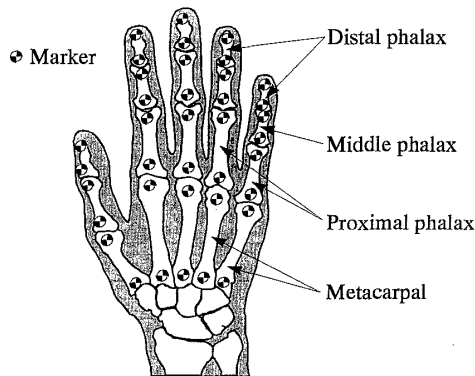


Fig. 5 Marker location

また、解析においては、得られた筋電位波形の絶対値を採用し、同一条件で得られた3回の測定筋電位を平均処理した平均筋電図波形を算出した後、この波形を積分して筋電図積分量を導出した。

把握形態に関係する各指関節の屈曲角度を測定するために、図5に示すように、各被験者の拇指、示指、中指、環指および小指の中手骨、基節骨、中節骨および末節骨の近位端と遠位端の手背側皮膚表面上にマーカを配置してビデオカメラにより4方向から把握動作を撮影した。この4方向同時ビデオ撮影法により得られた各2次元座標をDLT法(Direct Linear Transformation technique)を用いて3次元座標に変換し、各指関節屈曲角度を算出した。

円筒を把握した時の手指掌と円筒間の接触面積を正確に測定するために、図6に示すように各被験者の手指掌の表面にインクを塗る手法を利用した。それぞれの直径を有する各円筒表面に紙を巻付け、図3に示す把握力の測定時と同様にして得られる“握りの手形”をイメージスキャナを介してパーソナルコンピュータに取り込んだ。次いで、これらを基に白黒の二値化画像を得た後、そのピクセル数を利用した面積計算処理

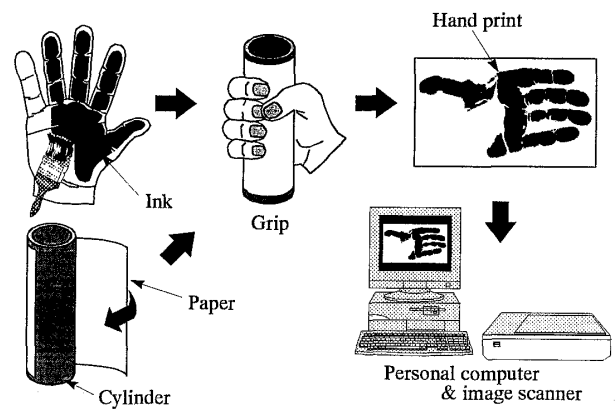


Fig. 6 Determination of contact-area on the cylinder

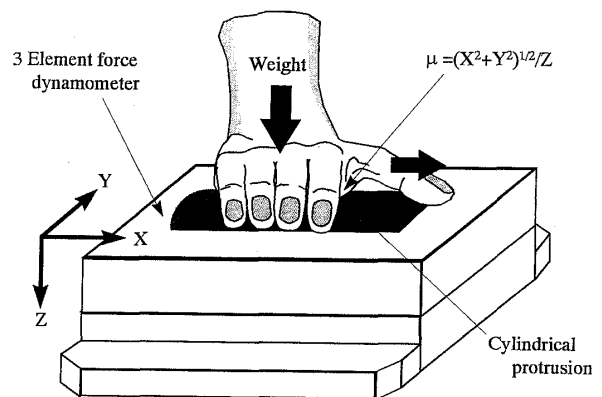


Fig. 7 Measurement of frictional coefficient

により接触面積を決定した。

円筒を把握する場合の手指掌と円筒間の摩擦係数を測定するに当たって、円筒把握時に直接測定が不可能なことから、図7に示すように3成分動力計(形式9257B:キスラー社製)を用いた。重さが9.8N, 19.6N, 29.4N, 39.2Nのおもりを手背側上にのせた手を水平方向に動かした場合の平均最大摩擦係数 μ を $(X^2+Y^2)^{1/2}=\mu Z$ により求めた。ここで、 X , Y , Z は互いに直交する3軸方向の分力をそれぞれ表すものとする。なお、発汗などにより接触境界面に介在する水分などの影響をできるだけ取り除く必要がある。そこで、一般的な把握時を考慮して脱脂処理などは行っていないが、同一な実験条件を得るために各被験者は手指掌を石鹸洗浄するとともに、水洗いし、乾燥後、短時間内に測定を行った。

3. 結果および考察

3.1 握り感覚と円筒直径 図8は、SD法による10名の被験者の主観的申告に基づく円筒把握時の円筒直径および重量に対する握り感覚の平均評価値を示す。ここで、握り感覚の評価値は、+3を「非常に握り易い」、+2を「かなり握り易い」、+1を「やや握り易い」、0を「どちらでもない」、-1を「やや握りにくい」、-2を「かなり握りにくい」、-3を「非常に握りにくい」とそれぞれ定義し、7段階に分類した。円筒重量が増加すると握り易さは低下し、重量に関係なく、円筒直径が約38mm前後において最も握り易いと感じていることが確認される。

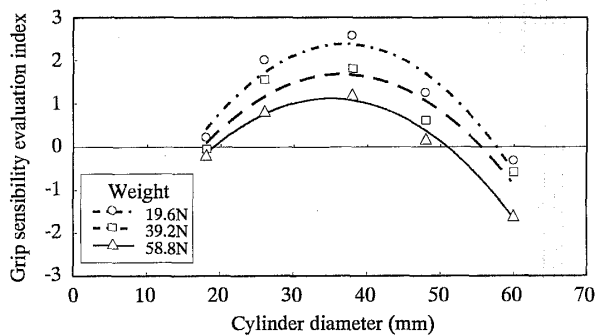


Fig. 8 Grip characteristics by semantic differential technique

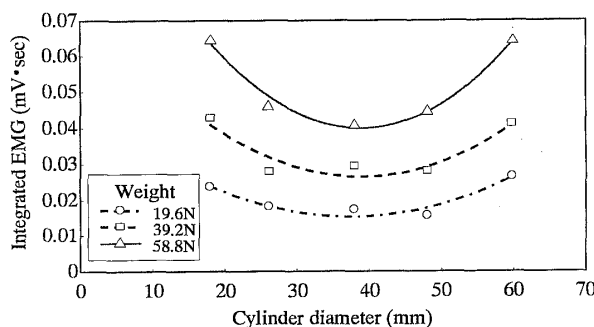


Fig. 9 Integrated EMG of muscle force at prehension

に握りにくい」とそれぞれ定義し、7段階に分類した。円筒重量が増加すると握り易さは低下し、重量に関係なく、円筒直径が約38mm前後において最も握り易いと感じていることが確認される。

3.2 筋電図積分量と円筒直径 筋電位は個々の被験者によって出力電位レベルが大きく異なることから個々の被験者について解析を行った。図9は、被験者Gの筋電図積分量と円筒直径および重量の関係を示している。筋電図積分量は、筋の活動レベルに対応した筋力の指標を意味し、円筒直径の大きさに関係なく、円筒重量とともに比例的に増加する。また、円筒直径が大きくなるに従って筋電図積分量は減少し、円筒直径が約38mm前後で最小となる。円筒直径がさらに大きくなると再び筋電図積分量が増加する傾向が認められることから円筒直径が約38mm前後において最小の筋力で把握していることになる。このことから、円筒直径が38mmより小さい場合、指関節の屈曲角度が大きくなって各指節部に分布する力が互いに干渉するため筋電図積分量は大きくなり、逆に円筒直径が38mmより大きい場合には、指関節の屈曲角度が小さくなって各指先端部のみが把握動作に関係するため筋電図積分量が再び大きくなるものと思われる。また、これらの傾向は他の被験者においても同様に認められた。

3.3 指の関節屈曲角度と円筒直径 円筒把握時の拇指を除く4指の各関節屈曲角度は、相対的に同じであることから、拇指の指節間関節(Interphalangeal joint of thumb: IP)、手指節関節(Metacarpophalangeal joint of thumb: MCP-T)の2関節と中指の遠位指節間関節(Distal interphalangeal joint: DIP)、近位指節間関節(Proximal interphalangeal joint: PIP)、中手指節関節(Metacarpophalangeal joint: MCP)の3関節における屈曲角度と円筒直径の関係を図10に示した。拇指のIP関節では、円筒直径が大き

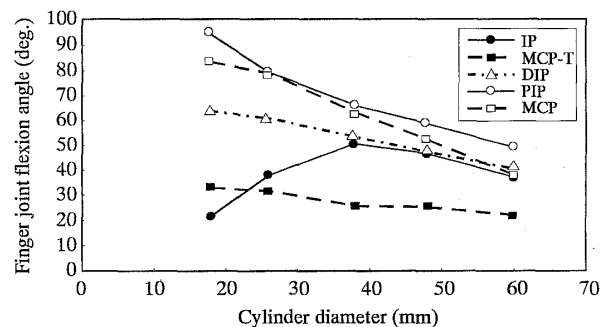
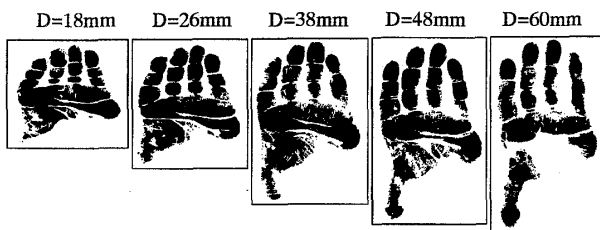


Fig. 10 Joint flexion angle of thumb and middle finger at prehension

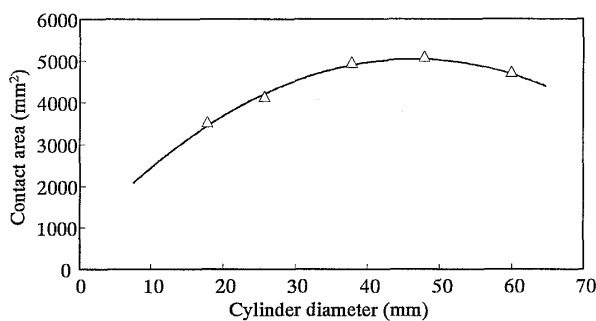
くなるに従って屈曲角度は増加し、直径が約 38 mm で最大となる。これ以上大きい直径に対しては再び減少する傾向が見られる。この原因は、中指の DIP 関節、PIP 関節、MCP 関節および拇指の MCP-T 関節の屈曲角度が直径の増大に従って減少し、拇指と中指の対立運動が円筒直径に応じて開くこと、また、直径約 38 mm 前後から拇指先端部が把握動作に関与するようになるためであると思われる。

3・4 手指掌の接触面積と円筒直径 図 11 に、被験者 10 名の平均による直径の異なる各円筒を把握したときの手指掌の接触領域を示している。直径が大きくなるとともに接触領域も増加するが、直径が約 48 mm 以上では逆に減少する傾向が見られた。これは、円筒直径が小さくなるほど、拇指以外の名指において、DIP、PIP、MCP の各関節屈曲角は大きくなり、各指の基節骨と中節骨掌側部の接触領域は小さくなることを示している。また、直径の増加とともに円周が大きくなるため、拇指以外の 4 指の各関節屈曲角が減少するとともに基節骨と中節骨掌側部の接触領域は、直径が約 48 mm まで増加する。他方、直径が 48 mm を越えると手掌部を横方向に走る中手骨アーチの影響により手掌中央の一部が非接触状態となり、接触領域が減少すると考えられる。

3・5 手指掌の摩擦係数 図 12 に、3 成分動力計を用いて得られた手指掌の摩擦係数、垂直力および接触面積の関係を示す。手指掌の摩擦係数は垂直力が増



(a) Contact area on the palm



(b) Variation of contact area with cylinder diameter

Fig. 11 Contact area on the palm under grip motion

加すると減少し、接触面積の増加に伴って大きくなる傾向が認められる。このことは、垂直力が小さい場合には、手指掌部軟部組織の圧縮変形は小さく、同時に手指掌表面での接触面積も小さくなるため、水平方向に力が作用しても横方向に自由に変形し得ることを示している。逆に、垂直力が大きくなると圧縮による軟部組織の変形も大きくなり、手指掌表面での接触面積が増加するため横方向への変形が拘束されると考えられる。したがって、手指掌の摩擦係数は垂直力と接触面積に深く依存することがわかる。

また、図 13 に垂直力を接触面積で単純に除して得られる接触圧力と摩擦係数の関係を示した。接触圧力が増加するとともに摩擦係数は減少し、2.0 に漸近するが、この状態では手指掌における軟部組織の横方向への変形が限界に達していると思われる。したがって、手指掌の摩擦係数は接触圧力にもかなり依存することが認められた。

3・6 把握力と円筒直径 把握力と円筒直径および重量の関係を図 14 に示す。いずれの円筒直径に対しても、おもりの重量が増加するとともに把握力は、

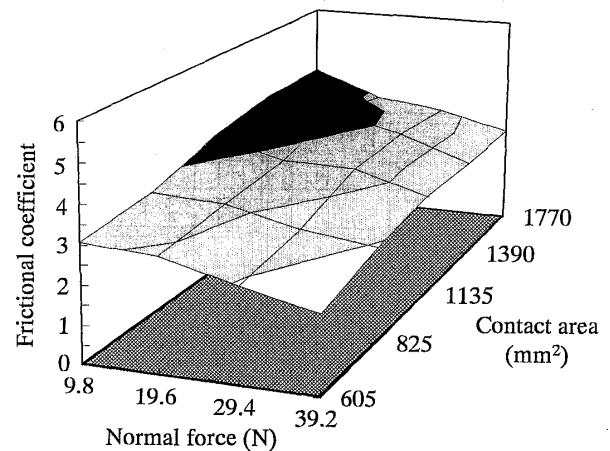


Fig. 12 Variation of frictional coefficient with contact area and normal force

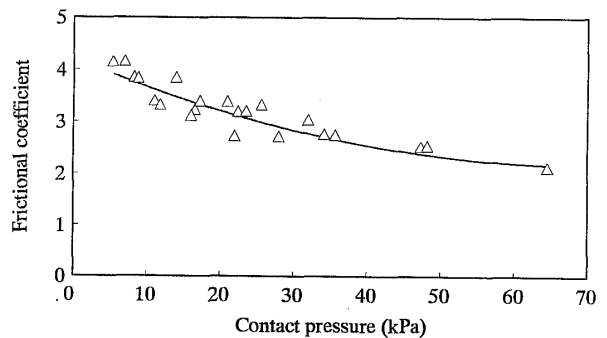


Fig. 13 Variation of frictional coefficient with contact pressure

ほぼ一定の割合で増加する傾向が見られる。また、直径の増加に伴い把握力も増加し、直径が約 38 mm 前後において最大値を示す。さらに直径が増加すると再び把握力は減少する傾向が認められる。これは、把握力が手指掌部と円筒間の接触境界面の状態に深く関係するため手指掌の接触面積と円筒直径の関係が上に凸の曲線で与えられること、摩擦係数が垂直力および接触面積に深く関係して接触圧力に大きく依存することに起因するためと思われる。

また、図 15 に把握力を手指掌と円筒間の平均接触面積で除した平均接触圧力と円筒直径および重量の関係を示す。接触圧力は、円筒が太くなるに従って低下することが確認できる。

3・7 握り易さに関する因子 握り感覚の官能評価の結果、円筒直径が約 38 mm 前後で最も握り易いことがわかった。この直径は、筋電図積分量が最小となり、把握力が最大となる直径にそれぞれ一致する。これは、握り易い直径の円筒では、把握のための筋力の伝達効率が最も高くなることを意味している。この結果は、八高ら⁽⁶⁾が前腕用太さ計を用いて保持力と手指掌の接触面積から求めた最も力を伝達しやすく、握り易い円筒直径の結果にほぼ一致する。

また、手指掌と円筒間の接触面積は、直径が約 48

mm 前後で最大となり、八高らが導いた握り易い直径と接触面積が最大になる直径は一致するとした結果に極めて近いが、八高らは、手指掌と円筒間の摩擦係数の影響を考慮していない。

円筒重量を W 、摩擦係数を μ 、把握力を F とした場合、把握した円筒が手から落ちないためには、 $W \leq \mu F$ を満足する必要がある。そこで図 13 に示した手指掌の摩擦係数と接触圧力の関係および図 15 に示す接触圧力と円筒直径の関係より、摩擦係数と円筒直径および重量の関係を求めると図 16 の結果が得られる。したがって、ここで得られた摩擦係数 μ と $W \leq \mu F$ の関係より、円筒を保持するのに必要な最小の把握力を求め、図 14 の把握力、円筒直径および重量の関係を考慮すると図 17 の結果を得る。図中の直線はいずれも $W = \mu F$ より得られる結果を示している。この結果より、直径が約 38 mm 前後において必要な最小の把握力と実際の把握力の差はおもりの重さに関係なく最も大きくなり、最も余裕感を持って円筒を握っていることがわかる。この直径は、握り易い直径に一致することから、握り易さは余裕を持って握ることとほぼ等価の関係にあると考えられる。さらに、円筒が次第に太さる過程で拇指先端部が円筒表面に接触し、把握に関与し始めるときの直径が最も握り易い

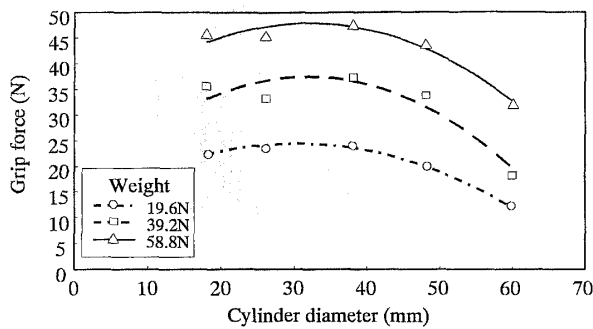


Fig. 14 Variation of grip force with cylinder diameter

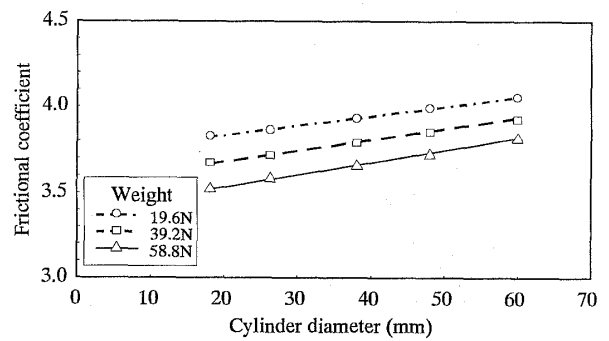


Fig. 16 Variation of frictional coefficient with cylinder diameter and weight

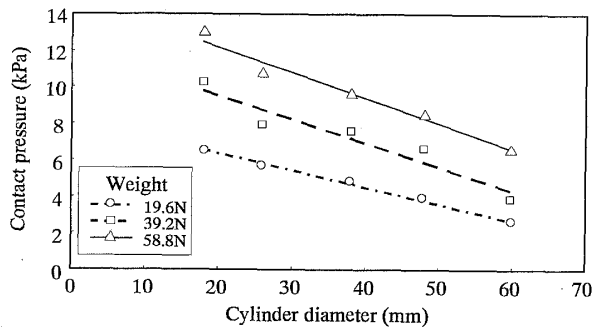


Fig. 15 Variation of contact pressure with cylinder diameter and weight

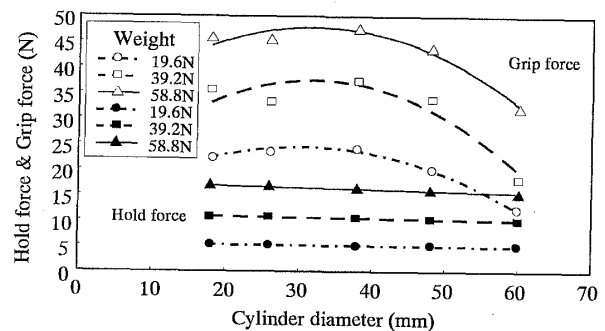


Fig. 17 Characteristics of hold force and grip force

直径となる。したがって、握り易さを感じずる握りとは、拇指以外の4指と手掌部のほかに、拇指先端部の加わった手指掌全体で円筒を包み込む把握状態であると考えられる。このことから、最も握り易い円筒直径は、図1に示した拇指と示指の先端部が触れた状態で作られる円の内側直径である握り内径に一致することになる。ただし、ここでは握り易い円筒直径として約38mmの値を明示したが、この結果は、被験者の手のサイズに依存しやすい。したがって、本結果を利用する上では表1に示す被験者の握り内径の平均値で除した無次元化のための換算値1.024と手の握り内径をともに考慮した上で握り易さを評価することが重要である。

4. 結 言

円筒の握り易さを明らかにするために、円筒の直径と重量を種々変えた場合の力学的パラメータを実験的に求め、以下の知見を得た。

(1) 直径が約38mm前後において把握力およびその伝達効率は最大となり、官能評価による最も握り易い直径に一致する。

(2) 拇指と中指の先端部が触れる手の握り内径は、官能評価による最も握り易い直径と一致する。

(3) 手指掌と円筒間の摩擦係数は、軟部組織の硬

さと変形度の影響を強く受け、把握力、接触面積、接触圧力に大きく依存する。

文 献

- (1) Kinoshita, H., ほか2名, Contributions and coordination of individual fingers in multiple finger prehension, *Ergonomics*, **38-6** (1995), 1212-1230.
- (2) Radwin, R. G., ほか3名, External finger forces in submaximal five-finger static pinch prehension, *Ergonomics*, **35-3** (1992), 275-288.
- (3) Buchholz, B., ほか2名, An investigation of human palmar skin friction and the effects of materials, pinch force and moisture, *Ergonomics*, **31-3** (1988), 317-325.
- (4) Gurrum, R., ほか2名, A study of hand grip pressure distribution and EMG of finger flexor muscles under dynamic loads, *Ergonomics*, **38-4** (1995), 684-699.
- (5) 例えば, 八高隆雄・ほか2名, 手-円筒物体間の力の伝達, *機論*, **60-573, C** (1994), 235-240.
- (6) 日本人間工学会生体計測部会編, 生体計測の標準化に関する報告書, *人間工学*, **6-1** (1970), 25-41.
- (7) 航空医学実験隊編, 航空自衛隊員の身体計測値—装備品等設計のための人間工学的資料—, (1980).
- (8) 日本規格協会編, 日本人の体格調査報告書—既製衣料の寸法基準作成のための—, (1978-1981), 日本規格協会.
- (9) 保志宏・ほか1名, 日本人成人男子112名の54項目生体計測値とそれらの示数ならびに相関係数, *解剖学雑誌*, **53-3** (1978), 238-247.
- (10) 例えば, Cnockaert, J. C., ほか2名, Relative contribution of individual muscles to the isometric contraction of a muscular group, *J. Biomech.*, **8** (1975), 191-197.